RENFORCEMENT PASSIF DE POUTRES PRÉCONTRAINTES ENDOMMAGÉES

David Folcher Étudiant gradué

Bruno Massicotte Professeur titulaire

Pierre Labossière Professeur titulaire

École Polytechnique de Montréal
Montréal (Québec) H3C 3A7

Université de Sherbrooke
Sherbrooke (Québec) J1K 2R1

RÉSUMÉ : L'état de certains ouvrages en béton précontraint qui composent le réseau routier québécois présente une problématique liée à la détérioration suite à un impact et ou à la corrosion. L'application d'une précontrainte externe permet de recouvrer les caractéristiques mécaniques de la structure mais demeure lourde à exécuter et onéreuse. Cet article présente l'étude du comportement de poutres précontraintes endommagées et renforcées avec des lamelles de fibres de carbone. L'étude se limite au comportement aux états limites d'utilisation et de fatigue, puisque généralement ce sont les critères qui gouvernent la conception des poutres précontraintes. Un programme expérimental consistant à tester en flexion huit poutres précontraintes présentant des niveaux d'endommagement et de réparation différents a été réalisé.

Les données recueillies durant la phase expérimentale ont permis de simuler analytiquement le comportement des poutres étudiées. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel AIS La comparaison entre les résultats expérimentaux et analytiques a démontré que les prédictions obtenues avec le logiciel étaient réalistes et fiables en ce qui concerne le comportement en service et à l'ultime des poutres précontraintes endommagées puis renforcées à l'aide de matériaux composites.

INTRODUCTION

Le réseau québécois des infrastructures de transport comporte un grand nombre d'ouvrages d'art. Parmi ceux-ci, on observe sur certains ponts et viaducs en béton précontraint une perte de capacité en flexion provenant de la corrosion ou la collision accidentelle de véhicules qui rendent des câbles de précontraintes inefficaces. C'est dans ce contexte de renforcement passif qu'un projet de recherche a été réalisé en collaboration entre le ministère des Transports du Québec (MTQ). L'objectif de ce projet était d'étudier la faisabilité du renforcement à l'aide de matériaux composites de poutres précontraintes endommagées. Dans un premier temps, le projet devait mettre en évidence les aspects importants liés à ce genre de réparation puis développer une méthode de calcul exacte pour des fins de conception et d'établir les critères de calcul devant être appliqués dans le cas du renforcement de poutres précontraintes.

Le projet de recherche a consisté principalement en l'étude expérimentale du comportement en flexion de poutres en béton précontraint endommagées puis réparées à l'aide de fibres de carbone afin de récolter des données permettant de faire une évaluation rigoureuse de cette solution par rapport aux solutions existantes. Les résultats expérimentaux ont servi à valider un logiciel de calcul AIS développé à l'ÉPM pour le MTQ (Bédard et Massicotte, 2001) afin de simuler le comportement en flexion d'une section quelconque. Ce logiciel pourrait devenir l'outil de base pouvant être utilisé par les ingénieurs du Ministère pour établir la faisabilité de diverses méthodes de renforcement, par précontrainte externe ou par ajout de matériaux de renforcement passifs.

Les critères de conception aux états limites d'utilisation dans le domaine des ponts en béton précontraint sont, la plupart du temps, plus sévères que ceux reliés aux états limites ultimes. Une

perte de capacité en flexion due à un endommagement sera donc plus critique du point de vue de la fissuration ou de la flèche puisque à l'ultime, les poutres sont surdimensionnées par rapport aux charges de conception. Ainsi l'étude a porté essentiellement sur le comportement en service, soit aux états limites d'utilisation et de fatigue. Les paramètres choisis sont le niveau d'endommagement de la section, le niveau de réparation et la méthode de renforcement.

ÉLABORATION DU PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Conception des spécimens

Dans un souci de réalisme, la conception des spécimens testés dans le cadre du présent mémoire s'est fait en fonction d'un cas existant constitué de quatre poutres AASHTO de type V de 38.1 m de portée espacées à 3 m avec un tablier de 11.9 m de largeur. Trois caractéristiques ont été reproduites dans les spécimens, soit le type de torons, leur position et l'état de contrainte à la fibre inférieure de la poutre. Ce dernier paramètre a été calculé à l'aide des données fournies par le MTQ. Après la prise en compte des pertes dues au fluage et au retrait du béton ainsi qu'à la relaxation des aciers, la contrainte de compression à la fibre inférieure a été calculée à 8,5 MPa. Il a donc été décidé d'utiliser des spécimens de section rectangulaire 750 x 250 mm comprenant quatre lits de précontrainte dans la partie inférieure et un lit de précontrainte dans la partie supérieure. Chaque lit est constitué de 4 torons de 12,7 mm de diamètre à basse relaxation, chaque toron consistant en 7 brins, dont la section nominale est de 98,7 mm^2. La figure 1 montre le design final des spécimens ainsi calculés.

Choix de l'endommagement

Il a été choisi de tester deux configurations différentes soit une détérioration de 25 % des torons, ce qui correspond à un lit complet, soit une perte de 50 % de la force de précontrainte, ce qui correspond à deux lits complets. L'endommagement est simulé en sectionnant, à la mi-portée des poutres, le nombre de torons correspondant à la configuration souhaitée. La figure 2 montre les trois configurations.

Niveau de réparation

La réparation consiste à remplacer le béton manquant par un coulis de réparation. Ce programme expérimental se limite exclusivement à un type précis de matériaux composites soit des fibres de carbone sous forme de lamelles rigides liées au support de béton par une colle à base d'époxy, ayant la consistance d'un mortier. L'ensemble des fournitures pour les matériaux composites sont de la compagnie Sika.

Le matériau composite utilisé (CarboDur) est disponible en 3 largeurs différentes à savoir, 50 mm, 80 mm et 100 mm, et en 2 épaisseurs soit 1.2 mm ou 1.4 mm. Il existe 3 variantes (S, M, H) du même produit avec des modules d'élasticité et une déformation à l'ultime différents. Pour l'effet recherché dans ce programme expérimental, on utilise des lamelles de 1.2 mm d'épaisseur par 100 mm de largeur offrant une déformation à l'ultime maximale (CarboDur S1012) afin d'avoir une compatibilité des déformations, entre le béton et les lamelles, aussi bonne que possible dans le but d'éviter des contraintes de cisaillement à l'interface trop importantes. La quantité de renforcement nécessaire a été calculée afin d'obtenir la même résistance à l'ultime que les torons endommagés. Cependant, les dimensions de la poutre limitent à deux la quantité maximale de lamelles de 100 mm pouvant être collées sur la face inférieure des poutres.

Compte-tenu de ces deux conditions, il a été décidé d'utiliser deux configurations de réparations différentes soit : deux lamelles collées, ce qui représente 100 % de ce qui est réalisable, et une lamelle, ce qui correspond à 50 % du renforcement maximal possible.

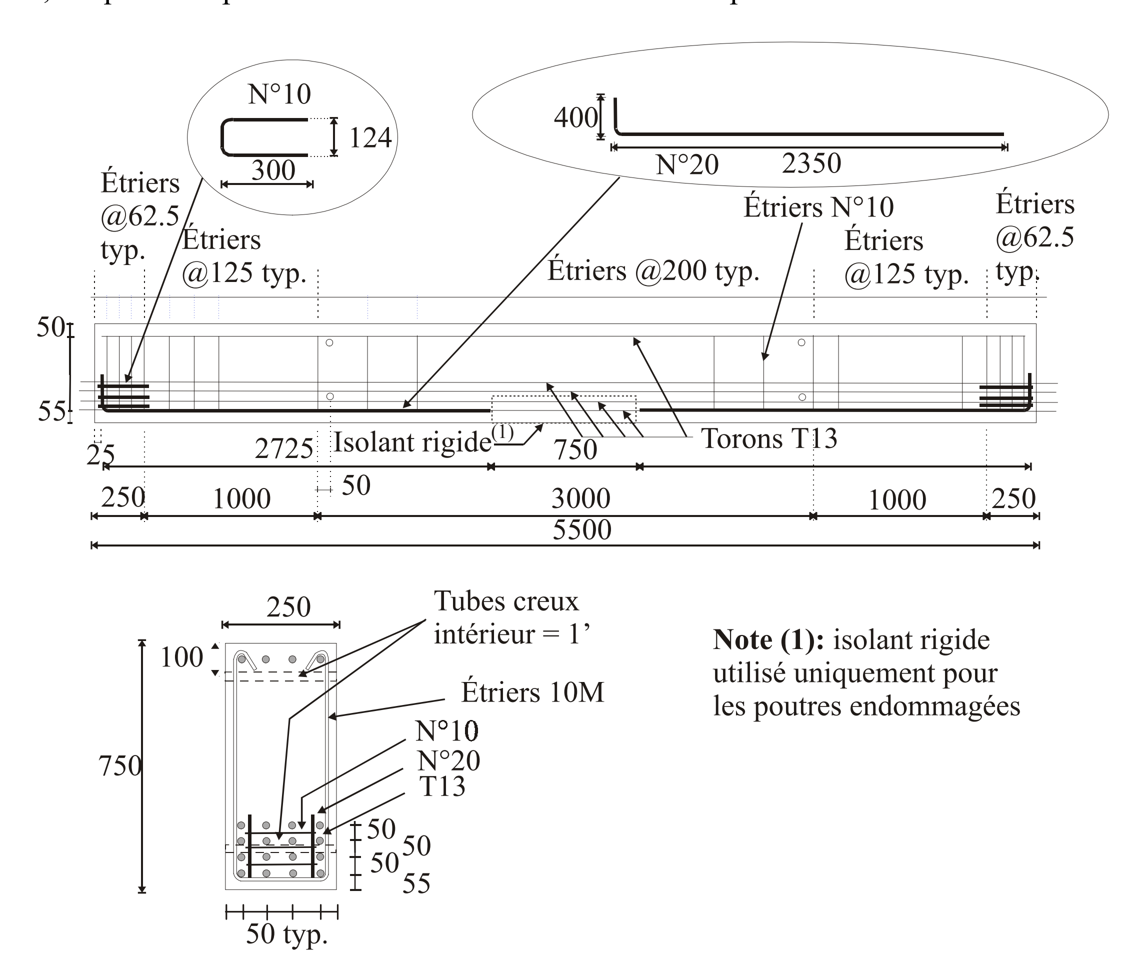


Figure 1 - Design final des spécimens

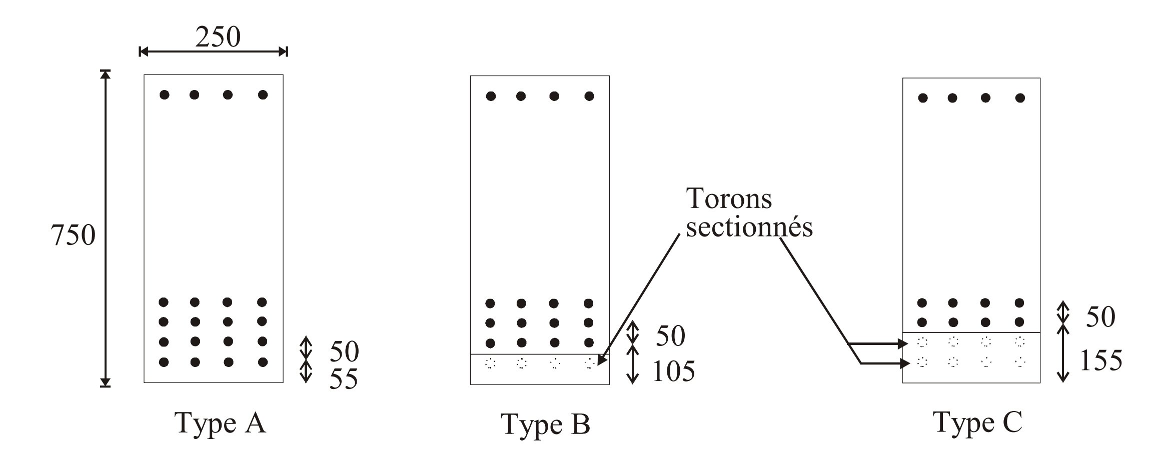


Figure 2 -Sections types

Programme expérimental

L'ensemble du projet comprend les essais en flexion de huit poutres précontraintes dont sept endommagées puis réparées à des niveaux différents. Le tableau 1 décrit l'ensemble des tests constituant le programme expérimental.

Tableau 1 - Récapitulatif des essais de flexion

Spécimens	Endommagement	Réparation	Type de test	Observations
A1	Aucun	Aucun	Statique	Poutre de référence
B1	1 lit endommagé 4 torons inefficaces	Précontrainte externe	Statique	Pour fin de comparaison
B2		2 lamelles	Statique	/
B3		1 lamelle	Statique	/
C1	2 lits endommagés 8 torons inefficaces	2 lamelles	Statique	/
C2		1 lamelle	Statique	/
C3		2 lamelles	Statique	Avec renfort d'ancrage maximum
C4		1 lamelle	Fatigue à grande amplitude	5 x 10 cycles avec amplitude variable

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Chaque essai a permis d'obtenir des mesures sur le comportement du béton, des lamelles de fibres de carbone ainsi que de la flèche. Le tableau 2 présente des données qui traduisent le comportement général des éléments testés sous chargement statique.

Le tableau 2 permet de mentionner que la fissuration intervient toujours au même stade de chargement soit environ 73 % de la charge de fissuration pour la poutre de contrôle, si on fait exception de la poutre B2 pour laquelle le comportement de la poutre intacte a été recouvré et de la poutre B1 qui avait une précontrainte externe. La valeur de fissuration de la poutre B1 est supérieure à celle de la poutre de référence, ce qui s'explique par le fait que la force exercée par le système de précontrainte externe était légèrement supérieure à celle nécessaire pour compenser la perte d'un lit de précontrainte. Il semble donc que le moment de fissuration soit peu influencé par le niveau d'endommagement ou de réparation.

En contre partie, le décollement prématuré des composites n'a pas permis d'évaluer la contribution de ceux-ci par rapport à l'amélioration de la résistance ultime d'une poutre endommagée. L'ajout de renfort d'ancrage permet d'atténuer le décollement et d'avoir un gain en capacité comme le montrent les résultats de la poutre C3. Il faut noter cependant que le décollement des matériaux composites n'a pas affecté le déroulement de ce projet ni les conclusions qui en découlent puisque celui-ci consistait essentiellement à étudier la phase de fissuration et le comportement en service.

Tableau 2 - Comportement général

Poutre	Moment (kN.m)				Mode de rupture
	M_{cr}	$M_{cr}/M_{cr,A}$	$M_{max.}$	$M_{max}/M_{max,A}$	
A Référence	354	/	1177	/	Écrasement du béton
B1 Préc. externe	460	1.3	1124	0.96	Écrasement du béton
B2 2 lamelles	339	0.96	1101	0.94	Écrasement du béton et décollement des lamelles
B3 1 lamelle	260	0.73	1010	0.86	Décollement des lamelles
C1 2 lamelles	259	0.73	737	0.63	Décollement des lamelles
C2 1 lamelle	257	0.73	765	0.65	Décollement des lamelles
C3 2 lamelles	261	0.74	872	0.74	Décollement des lamelles

Les figures 3 et 4 présentent l'ensemble des mesures expérimentales du moment en fonction de la courbure. On observe que les poutres qui présentent le même niveau d'endommagement se comportent de la même façon, indépendamment de leur niveau de renforcement jusqu'à un niveau avancé de chargement. Cependant, les éléments les plus endommagés atteignent des valeurs de courbure plus importantes.

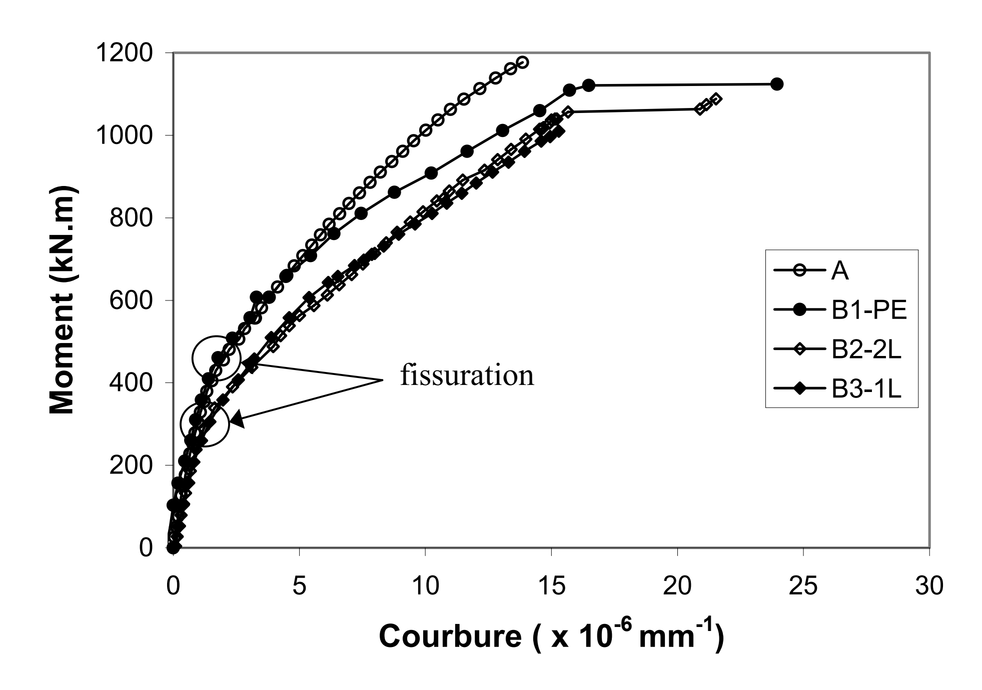


Figure 3 - Diagrammes moment - courbure

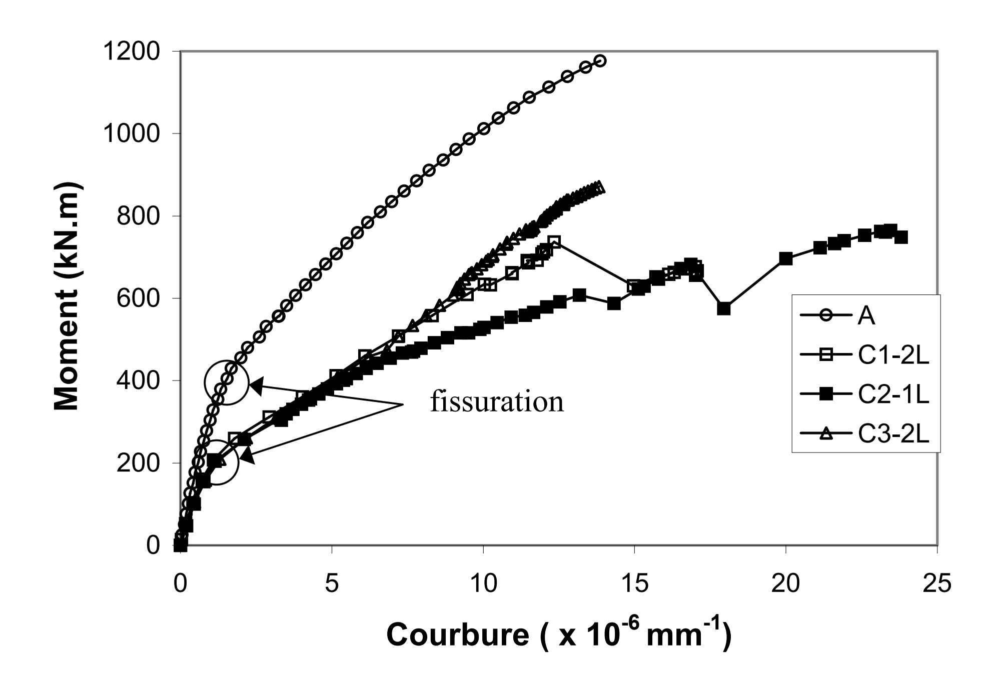


Figure 4 - Diagramme moment – courbure

MODÉLISATION AVEC AIS

L'analyse théorique des différents essais réalisés dans le cadre du programme expérimental a été effectuée à l'aide du logiciel *AIS* pour Analyse Inélastique des Structures (Bédard et Massicotte, 2001). L'ensemble des types de section qui font l'objet du programme expérimental ont été simulées. La figure 5 présente une comparaison entre les diagrammes moment – courbure obtenus par simulation et celui mesuré expérimentalement pour la poutre B3. Une précision comparable a été obtenu avec les autres poutres du programme expérimental, ce qui permet de conclure que le logiciel AIS peut être utilisé comme outil de prédictif du comportement des poutres renforcées avec des matériaux composites.

ÉTUDE PARAMÉTRIQUE

Une étude paramétrique, avec AIS, a été menée dans le but de mettre en évidence les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation des matériaux composites comme renforcement passif. Le pont mentionnée précédemment a inspiré la modélisation de la poutre étudiée.

Paramètres étudiés

Les simulations réalisées avaient pour but d'analyser l'influence des principaux paramètres, soient: le niveau d'endommagement, le type de réparation et le niveau de réparation. Le tableau 3 présente l'ensemble des simulations réalisées.

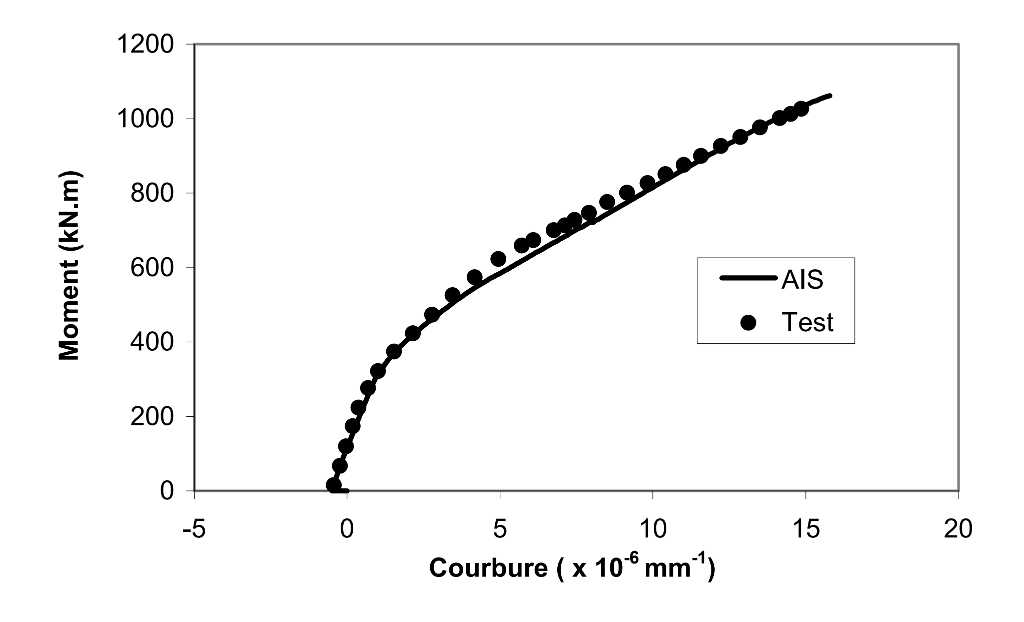


Figure 5 - Réponse moment – courbure de la poutre B3

Tableau 3 - Paramètres de modélisation

Section	**Niveau d'endommagement**	**Type de réparation**	**Niveau de réparation**
E0 Référence	Intacte	/	/
E1	1 lit perdu	Aucune	/
E1E		Précontrainte externe	1306 kN
E1C		Composite rigide	1320 mm^2
E2	2 lits perdus	Aucune	/
E2E		Précontrainte externe	2621 kN
E2C		Composite rigide	1320 mm^2

Pour le renforcement par précontrainte externe, la force appliquée correspond à celle requise pour redonner au béton la contrainte présente avant l'endommagement. Pour le renforcement par lamelles de composites rigides, la quantité utilisée correspond à la quantité maximale qui peut

être installée pour le produit utilisé dans cette étude, à savoir au-dessous et sur les côtés de la semelle inférieure.

Le projet de recherche a permis d'identifier que la situation à plus critique correspondait à l'état limite de fatigue d'un toron dans une poutre fissurée. Dans une telle situation, le code Canadien des ponts (CSA, 2000) limite la variation de contrainte à 125 MPa. Pour le pont choisi dans l'exemple, l'augmentation du moment fléchissant dû aux chargement CL-625 à l'état limite de fatigue pour la poutre extérieure est d'environ 2925 kN-m alors que le moment fléchissant dû aux charges permanentes est égal à 4225 kN-m, de sorte que le moment maximal devant être considéré est 7150 kN-m.

Résultats des analyses

Les résultats des analyses sont présentés aux figures 6 et 7 où la contrainte dans le dernier lit efficace est donnée pour diverses situations d'endommagement. La figure 6 présente le cas où un lit est manquant. La variation de moment induit par le passage d'une CL-625 pour la poutre non renforcée cause une augmentation de contrainte environ égale à la limite permise de 125 MPa. En principe la poutre n'aurait pas besoin d'être renforcée, du moins en ce qui a trait au critère choisi. Dans le cas présenté sur la figure 7, deux lits sont manquants. Dans ce cas, la faible efficacité du matériau composite rigide utilisé fait en sorte que le pont renforcé à son niveau maximal avec ce type de matériaux ne peut être renforcé efficacement.

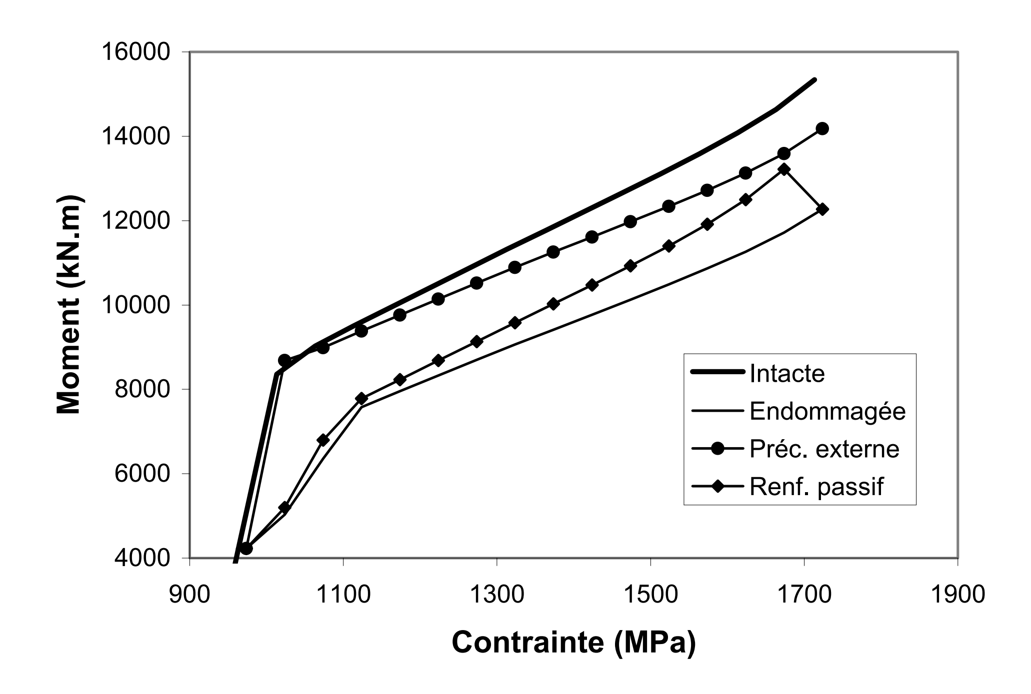


Figure 6 - Contraintes dans le dernier lit de torons efficaces pour un lit endommagé

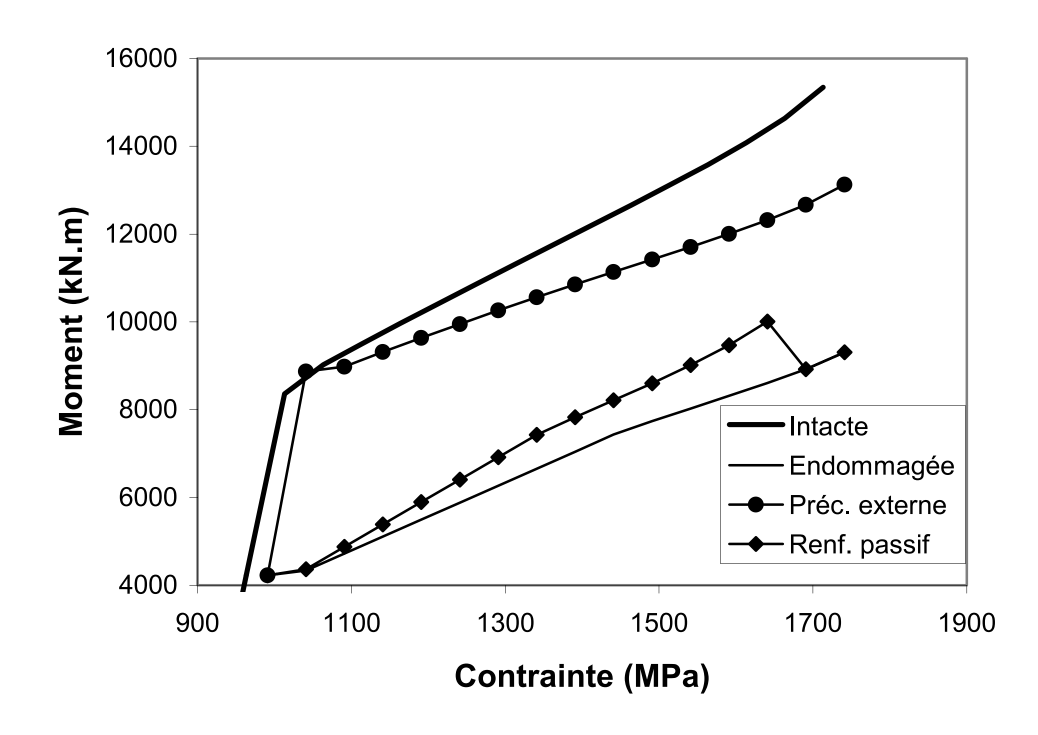


Figure 7 - Contraintes dans le dernier lit de torons efficaces pour deux lits endommagés

Autre technique
Afin d'étudier les possibilités de renforcement dans le cas de la perte de deux lits, un matériaux composite multicouches souple ayant une épaisseur nominale de 1 mm par couche et un module de 65000 MPa a été utilisé. Les résultats des analyses réalisées avec AIS sont présentés sur la figure 8. On constate dans ce cas qu'avec une réparation d'environ 10 couches la poutre retrouve un niveau de performance adéquat.

CONCLUSIONS

L'étude expérimentale a permis d'observer une faiblesse dans le l'ancrage du matériau composite à la structure alors qu'une décollement au niveau de l'interface colle-lamelle a été observé pour tous les essais. Une telle situation est préoccupante. Toutefois, dans la zone faisant l'objet de l'étude, à savoir sous les charges d'utilisation, la méthode de renforcement semble adéquate.

Le projet de recherche a permis de démontrer que le logiciel AIS constituait un outil fiable pour évaluer la faisabilité de diverses techniques de renforcement. Cet outil pourrait être utilisé en pratique pour calculer la résistance des sections endommagées et renforcées. L'étude paramétrique réalisée avec ce logiciel a permis de mettre en valeur la contribution des matériaux composites pour le comportement en service. Les analyses où les critères de service et de fatigue prescrits par le Code CSA/S6-00 ont été appliquées ont démontré que l'usage des matériaux composites comme renforcement externe pour des poutres précontraintes endommagées était

applicable pour un niveau d'endommagement limité mais que dans tous les cas étudiés, le comportement originel de la section n'était jamais rétabli.

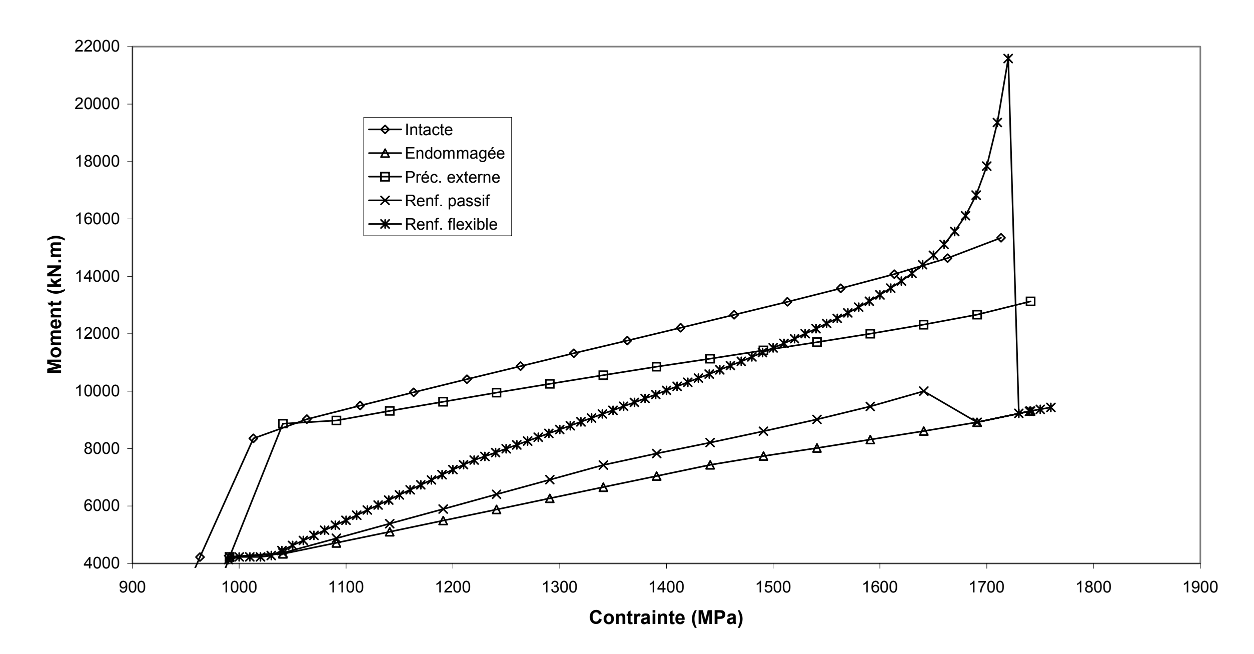


Figure 8 - Contraintes dans le dernier lit de torons efficaces pour deux lits endommagés pour une réparation avec des composites souples

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient, pour leur support financier, le ministère des Transports du Québec, le CRSNG et le fonds FCAR. Les auteurs remercient les nombreux étudiants et techniciens du laboratoire de Structures de l'École Polytechnique pour leur précieuse assistance.

RÉFÉRENCES

Bédard, S. et Massicotte, B. 2001. AIS: Analyse inélastique des structures. Manuel d'utilisation. École Polytechnique de Montréal.

CSA. (2000). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, CAN/CSA-S6-2000. Association canadienne de normalisation, Rexdale, Ontario.